

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.01.016>

УДК 519.6, 550.8

Н.Л. Миронцов

Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев
E-mail: myrontsov@ukr.net

Решение обратной задачи электрометрии скважин повышенного вертикального разрешения

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А.Н. Трофимчуком

Предложен новый быстрый способ решения обратной задачи многозондовой электрометрии скважин, который позволяет учитывать количественный вклад измерения каждого зонда в окончательный результат. Разработан и реализован в программном виде соответствующий алгоритм решения обратной задачи. Показано, что предложенный подход позволяет также существенно улучшить вертикальное разрешение метода в целом. Приведен пример сравнения различных результатов решения обратной задачи бокового каротажного зондирования и бокового каротажа при изменении вклада измерения каждого зонда в окончательный результат.

Ключевые слова: обратная задача электрометрии, электрический каротаж, вертикальная разрешающая способность.

Современный спектр направлений инновационных и научных исследований Института телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины достаточно широк [1–3]. Одним из таких направлений является геофизическое исследование скважин [4], актуальность которого сложно переоценить в настоящее время [5].

Эффективность того или иного метода решения обратной задачи определяется используемым способом определения данных измерения зондов для выбранных параметров среды; выбором параметра “близости” рассчитанных показаний зонда и реальных; избранным способом подбора параметров модели для выбранного параметра “близости”.

Эти вопросы можно перефразировать соответственно как:

выбор способа решения прямой задачи (конечные разности, конечные элементы, интегральные токи, полуаналитическое решение и т.п.);

вид функционала, который будет минимизироваться при решении обратной задачи (ранее этот пункт выглядел как “выбор наглядно ближайшей палетки”);

способ итерационного процесса решения обратной задачи.

© Н.Л. Миронцов, 2020

Начинать реализовывать решение обратной задачи следует с формализации требований к соответствующему алгоритму. Требование точности очевидно, и во многом возможность его выполнения зависит от точности имеющегося алгоритма решения прямой задачи [6–8], т.к. решение обратной задачи, как правило, представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого используется решение прямой задачи [7, 8]. Полагая, что точность решения прямой задачи не вызывает сомнения (мы исходим из того, что уже имеем надежный, быстрый и точный алгоритм ее решения для электрического каротажа (ЭК) [9, 10] или индукционного каротажа (ИК) [11, 12]), сосредоточимся на другом требовании – увеличении скорости процесса расчета (на требовании сокращения времени минимизации функционала невязки).

Без ограничения общности будем рассматривать трехслойную модель пласта, вскрытого скважиной (рис. 1). Для начала построим таблицу, связывающую значения компонентов вектора из области геоэлектрических параметров модели с компонентами вектора из области данных измерения.

В случае трехслойной модели таблицу, которая связывает ρ_3/ρ_C , D/d и ρ_{II}/ρ_C с набором УС ρ_i/ρ_C , $i=1, n$, где n – количество зондов комплекса (для удобства и без ограничения общности сразу положим $\rho_C = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Построение каждой строки такой таблицы требует решения по крайней мере одной прямой задачи. Для комплекса, состоящего из зондов бокового каротажного зондирования (БКЗ) (формулы зондов: $N6,0M0,5A$, $A0,4M0,1N$, $A1,0M0,1N$, $A2,0M0,5N$, $A4,0M0,5N$, $A8,0M1,0N$, $N0,5M2,0A$) и зонда бокового (фокусированного) каротажа БК-3 (БК) для получения одной строки нам придется решать две прямые задачи, используя быстрые и эффективные методы [8].

Выбрав необходимые параметры ρ_3 , D/d , ρ_{II} для пласта бесконечной мощности мы решаем прямую задачу ЭК для геометрии БКЗ, затем для геометрии БК и формируем j -ю строку таблицы в виде значений:

$$\rho_3^j, (D/d)^j, \rho_{II}^j, \rho_{A0,4M0,1N}^j, \dots, \rho_{A8,0M1,0N}^j, \rho_{БК-3}^j$$

Как правило, такую таблицу принято строить в би-логарифмическом масштабе. После завершения ее формирования уже можно реализовать алгоритм простейшего решения обратной задачи. А именно: перебирая строки таблицы, мы просто выбираем ту, для которой приведенные КС комплекса наиболее точно совпадают с фактически измеренными параметрами. Значения ρ_3^j , $(D/d)^j$, ρ_{II}^j из этой строки и будут искомыми параметрами нашей модели. Перебор можно реализовать автоматически, а критерий “совпадения” будет выглядеть как минимизация функционала:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2}, \quad (1)$$

где n – количество зондов комплекса; ρ_i^T – рассчитанные значения КС для рассматриваемой модели; ρ_i^P – фактически полученные значения КС; K_i – весовые коэффициенты каждого зонда комплекса, которые могут изменяться в том числе и интерпретатором.

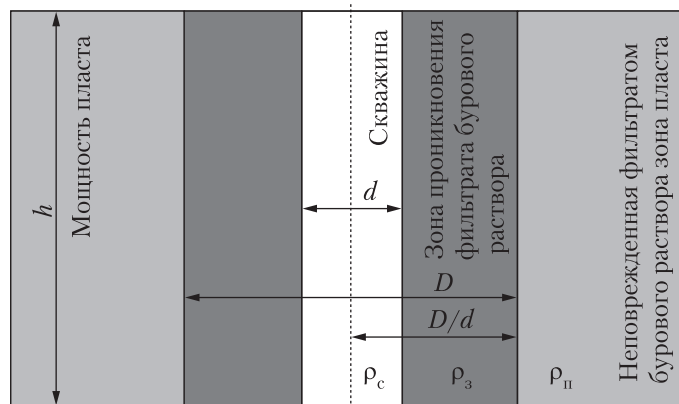


Рис. 1. Трехслойная модель пласта конечной мощности: $\rho_{п}$ – УС неповрежденной фильтратом бурового раствора части пласта; $\rho_{с}$ – УС бурового раствора (УС скважины); $\rho_{з}$ – УС зоны проникновения фильтрата бурового раствора; D/d – отношение диаметра зоны проникновения к номинальному диаметру скважины

Именно такой способ реализуется во многих программах интерпретации данных электротометрии. При достаточно плотном заполнении таблицы он дает неплохой результат, погрешность которого сопоставима с погрешностью самого каротажа.

Однако такой алгоритм имеет несколько недостатков:

- 1) его точность ограничена шагом перебора параметров $\rho_{з}$, D/d , $\rho_{п}$;
- 2) повышение точности требует уменьшения шага изменения параметров модели и соответственно приводит к увеличению объема таблицы, требует больших вычислительных ресурсов и увеличивает время решения.

Для трех параметров, если $\rho_{з}$, $\rho_{п}$ могут принимать по 1000 различных значений, а D/d – двадцать значений, мы будем иметь 20000000 строк в таблице. Это еще можно рассматривать как вариант для решения задачи для трехслойной модели, но уже для четырехслойной такой подход, в качестве основного, оказывается нерациональным.

Однако мы будем использовать такую таблицу, как вспомогательное средство на этапе подготовки к решению обратной задачи.

Таблица, сформированная для 5 различных значений для D/d и 50 различных значений для $\rho_{з}$, $\rho_{п}$ (1250 строк в таблице) значительно облегчает и ускоряет дальнейшее решение (для четырехслойной модели при количестве возможных вариантов изменения параметров промытой зоны (соответственно 5 для диаметра и 50 для ее УС) мы будем иметь таблицу, состоящую всего из 312500 строк). Используем ее для построения первого приближения в дальнейшем процессе итерационной минимизации (1).

Итерационный процесс построим следующим образом. Выберем первое приближение искомых параметров в виде диапазона:

$$\rho_{з}^{\text{нижнее}} < \rho_{з} < \rho_{з}^{\text{верхнее}} \tag{2}$$

$$D/d^{\text{нижнее}} < D/d < D/d^{\text{верхнее}} \tag{3}$$

$$\rho_{п}^{\text{нижнее}} < \rho_{п} < \rho_{п}^{\text{верхнее}} \tag{4}$$

На следующем шаге разделим заданную таким образом область (2)–(4) плоскостями (см. рис. 2):

$$\rho_3 = \rho_3^{\text{нижнее}} + 0,5 (\rho_3^{\text{верхнее}} - \rho_3^{\text{нижнее}}), \quad (5)$$

$$D/d = D/d^{\text{нижнее}} + 0,5 (D/d^{\text{верхнее}} - D/d^{\text{нижнее}}), \quad (6)$$

$$\rho_{\text{II}} = \rho_{\text{II}}^{\text{нижнее}} + 0,5 (\rho_{\text{II}}^{\text{верхнее}} - \rho_{\text{II}}^{\text{нижнее}}). \quad (7)$$

на восемь областей. Теперь решим прямые задачи в вершинах параллелепипеда, образованного (2)–(4) и в точках пересечения плоскостей (5)–(7) с гранями этого параллелепипеда. То есть всего для 13 (в одной точке мы имеем решение с предыдущего шага итерации) точек из пространства параметров модели (см. рис. 2). Каждая из восьми областей монотонна в пространстве значений $\tilde{\rho}_i^T$. Выбираем из них ту, в которую попадают значения $\tilde{\rho}_i^P$. Вершины этой области выбираем в качестве границ интервалов (2)–(4) следующего шага итерационного процесса: $\rho_3^{\text{нижнее}}$, $\rho_3^{\text{верхнее}}$, $D/d^{\text{нижнее}}$, $D/d^{\text{верхнее}}$, $\rho_{\text{II}}^{\text{нижнее}}$, $\rho_{\text{II}}^{\text{верхнее}}$.

Продолжаем этот процесс, пока для заданного заранее значения невязки ε не выполнится условие:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2} < \varepsilon,$$

или если значение функционала не перестанет уменьшаться, что возможно, так как при переопределении задачи минимум функционала не обязательно будет равен нулю.

Область (2)–(4) для первого шага итерационного процесса мы строим с помощью нашей заранее рассчитанной таблицы, выбрав в качестве начальных значений близкие, но не равные между собой, параметры модели из строк, которые дают наименьшие значения (1).

Что касается решения такого количества прямых задач, то тут оправданно использовать так называемые потоки (stream). То есть использовать широко доступную в настоящее время возможность одновременного решения нескольких математических задач. Использование потоков приводит к тому, что почти за одно и то же время мы вместо решения одной прямой задачи решаем несколько (их количество определяется, разумеется, вычислительными мощностями используемого компьютера). Это оказывается удобным, поскольку для каждой точки, в случае решения об-

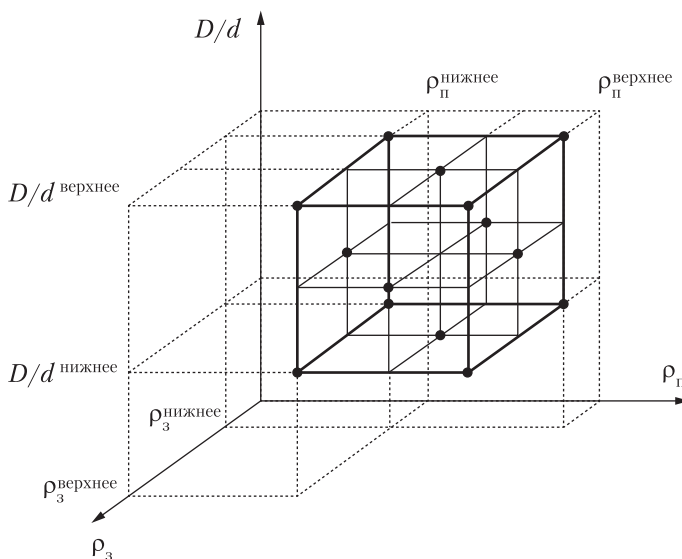


Рис. 2. Иллюстрация измельчения области параметров пласта. Выделены точки, для которых решается прямая задача на $n + 1$ шаге итерации

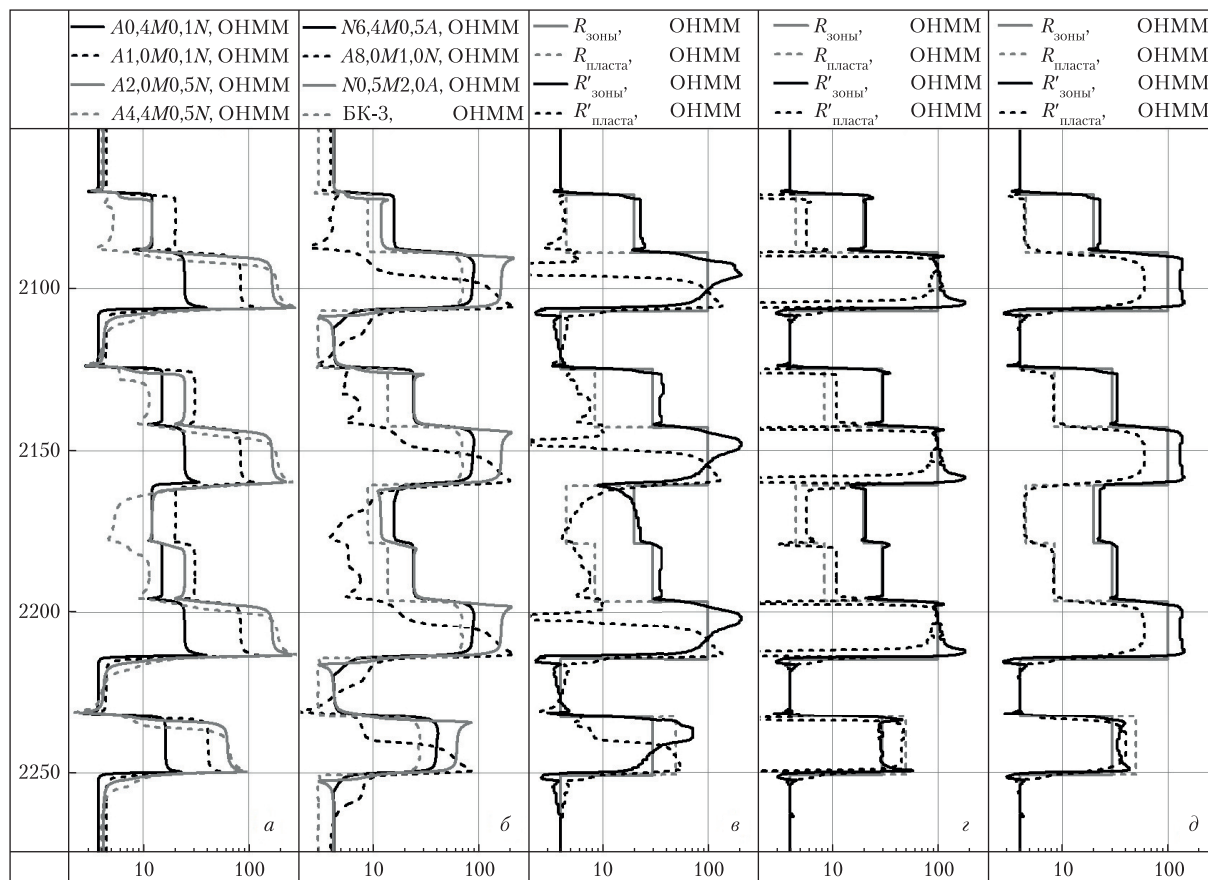


Рис. 3. Скважина “Тестовая-1” (УС бурового раствора 1 Ом · м). *a, б* – диаграммы УО зондов комплекса; *в* – результат обратной задачи, если все $K=1$; *г* – $K_{A4,0M0,5N}=0$, $K_{A8,0M1,0N}=0$; *д* – $K_{A4,0M0,5N}=0$, $K_{A8,0M1,0N}=0$ но $K_{7F1,6}=1$

ратной задачи “БКЗ+БК”, мы должны решать по две прямые задачи: одну задачу ЭК для БКЗ и одну задачу ЭК для БК.

Рассмотрим теперь конкретный пример решения обратной задачи “БКЗ+БК”.

Начнем с модели разреза, который состоит из последовательности некоторых наиболее типичных моделей пластов, расположенных в различной последовательности (глинистых, уплотненных высокоомных без проникновения, водонасыщенных, нефтенасыщенных и газонасыщенных) [9].

Будем для удобства называть скважину, соответствующую этой модели, “Тестовая-1”.

На рис. 3, *a, б* представлены диаграммы зондов комплекса “БКЗ+БК” для скважины Тестовая-1. На рис. 3, *в* – результат решения обратной задачи для всех зондов комплекса ($\forall i: K_i=1$) для этой скважины ($R_{\text{зоны}'}$, $R_{\text{пласта}'}$ – искомые параметры модели, $R'_{\text{зоны}'}$, $R'_{\text{пласта}'}$ – результат решения обратной задачи). Как и следовало ожидать: возникает искажение формы кривых в окрестностях положений горизонтальных границ пластов; существенно искажаются значения УС уплотненных высокоомных пластов; искажаются УС пластов повышающего проникновения, являющихся подошвой для высокоомного; значительно иска-

жаются параметры пласта (УС зоны и УС пласта) понижающего проникновения. В то же время удовлетворительно (для водонасыщенного ($\rho_{\text{п}} = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{з}} = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $D/d = 5$) почти идеально) выделяются параметры продуктивных пластов повышающего проникновения, кровлей которых не являются высокоомные пласты.

В случае исключения из процесса решения обратной задачи четырехметрового и восьмиметрового зондов (рис. 3, з) ситуация неожиданно улучшается. Параметры всех пластов гарантированно удовлетворительно определяются по кривым искомым параметров. Единственным недостатком является существенное искажение кривых в окрестностях горизонтальных границ пластов.

Оказалось, что этот недостаток очень просто устраняется путем присоединения к комплексу всего одного зонда ИК. В этом случае мы выбрали зонд 7Ф1.6 [8]. Полученное решение с добавленным зондом ИК (рис. 3, д) почти лишено искажения кривых в окрестностях положений горизонтальных границ пластов по сравнению с предыдущим результатом. Это наглядно демонстрирует преимущества совместного использования данных ЭК и ИК.

Сразу отметим тот факт, что вертикальное разрешение комплексов “БКЗ + БК” и “БКЗ + БК + ИК” так или иначе определяется вертикальным разрешением БКЗ. Это надо помнить при выборе весовых коэффициентов при минимизации (1). И особенно помнить об этом нужно при решении обратной задачи для контрастных тонкослойных наслоений.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы: применив быстрый способ решения минимизации функционала невязки в сочетании с возможностью учитывать вклад каждого зонда многозондового электротометрического комплекса в конечный результат решения обратной задачи был создан быстрый и высокоэффективный способ количественной интерпретации данных БКЗ, “БКЗ + БК”, “БКЗ + БК + ИК”. Разработанный алгоритм и созданное соответствующее программное обеспечение позволяют повысить точность определения геоэлектрических параметров нефтегазовых коллекторов. Результаты работы были внедрены в ОАО “Приднепровская горно-химическая корпорация”, ОАО “Геофизическое оборудование НАДРА” и используется в текущей работе ОАО “Укрспецгеология”. Продолжаются исследования для областей существования устойчивых решений и областей эквивалентных решений обратной задачи [13–15].

Работа реализована в рамках научно-технического проекта научных учреждений НАН Украины в 2019 г., а также содержит результаты исследований, выполненных при поддержке гранта Президента Украины для молодых докторов наук (конкурсный проект Ф44) за 2019 г.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: математичне моделювання і обчислювальні методи. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **10**, № 1. С. 7–30.
2. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: інформаційні технології. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **11**, № 2. С. 5–25.
3. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: екологічна безпека. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **12**, № 3. С. 7–25.

4. Миронцов М.Л. Вектор сучасних досліджень електрометрії нафтогазових свердловин. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **12**, № 3. С. 26–36.
5. Довгий С.О., Євдошук М.І., Коржнев М.М., Куліш Є.О., Курило М.М., Малахов І.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. Енергетично-ресурсна складова розвитку України. Київ: Ніка-Центр, 2010. 263 с.
6. Миронцов Н.Л. Численное моделирование электрометрии скважин. Київ.: Наук. думка, 2012. 224 с.
7. Myrontsov M.L. Solution of the inverse problem of electrometry of oil and gas wells (on the example of the BKZ + BK + IK complex). *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects: Extended Abstracts*. Kyiv, 2019. Paper 15884.
8. Миронцов М.Л. Електрометрія нафтогазових свердловин. Київ: ТОВ “Ви-во ЮСТОН”, 2019. 217 с.
9. Миронцов Н.Л. Решение прямых и обратных задач электрического и индукционного каротажа методом интегральных (полных) токов. *Теор. та прикл. аспекти геоінформатики*. Київ, 2009. С. 340–352.
10. Миронцов М.Л. Метод розв’язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2007. № 2. С. 128–131.
11. Миронцов М.Л. Метод розв’язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2004. №9. С. 130–133.
12. Миронцов М.Л. Метод швидкого розв’язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу. *Геофиз. журн.* 2007. **29**, № 5. С. 212–214.
13. Миронцов М.Л. Похибка та еквівалентні розв’язки оберненої задачі електрометрії свердловин. *Матем. моделювання в економіці*. 2018. **13**, № 4. С. 35–48.
14. Миронцов М. Проблема еквівалентності в обернених задачах електрометрії нафтогазових свердловин. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2018. **174–175**, № 1–2. С. 106–107.
15. Myrontsov M.L. The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. *18th Int. Conf. Geoinformatics – Theor. and Appl. Aspects: Extended Abstracts*. Kyiv, 2019. Paper 15885.

Поступило в редакцію 30.09.2019

REFERENCES

1. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Mathematical Modeling and Computational Methods. *Mat. modelyuvannya v ekonomitsi*, 10, No. 1, pp. 7-30 (in Ukrainian).
2. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Information Technologies. *Mat. modelyuvannya v ekonomitsi*, 11, No. 2, pp. 5-25 (in Ukrainian).
3. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Environmental safety. *Mat. modelyuvannya v ekonomitsi*, 12, No. 3, pp. 7-25 (in Ukrainian).
4. Myrontsov, M. L. (2018). Vector of modern studies of electrometry of oil and gas wells. *Mat. modelyuvannya v ekonomitsi*, 12, No. 3, pp. 26-36 (in Ukrainian).
5. Dovgiy, S. O., Yevdoschuk, M. I., Korjnev, M. M., Kulish, Ye. O., Kurilo, M. M., Malakhov, I. M., Trofymchuk, O. M. & Yakovlev, Ye. O. (2010). Energy resource component of Ukraine’s development. Kyiv: Nika-Center (in Ukrainian).
6. Myrontsov, M. L. (2012). Numerical modeling of electrometry in wells. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
7. Myrontsov, M. L. (2019, May). Solution of the inverse problem of electrometry of oil and gas wells (on the example of the BKZ + BK + IK complex). *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts*, (Paper 15884), Kyiv.
8. Myrontsov, M. L. (2019). Electrometry of oil and gas wells. Kyiv: Publishing house Yuston (in Ukrainian).
9. Myrontsov, N. L. (2009). Solving direct and inverse problems of electrical and induction logging using the method of integral (full) currents. *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky* (pp. 340-352), Kyiv (in Russian).
10. Myrontsov, M. L. (2007). Method of solving the direct and inverse problems of electric logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 2, pp. 128-131 (in Ukrainian).
11. Myrontsov, M. L. (2004). Method of solving the direct and inverse problem of induction logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 9, pp. 130-133 (in Ukrainian).

12. Myrontsov, M. L. (2007). A quick method of solving the inverse problem of induction logging. *Geophys. Journal*, 29, No. 5, pp. 212-214 (in Ukrainian).
13. Myrontsov, M. L. (2018). Operational margin and equivalent solutions of the wells electrometry inverse problem. *Mat. modelyuvannya v ekonomitsi*, 13, No. 4, pp. 35-48 (in Ukrainian).
14. Myrontsov, M. (2018). The problem of equivalence in the inverse problems of electrometry of oil and gas wells. *Geolohiya i geokhimiya horyuchykh kopalyn*, 174-175, No. 1-2, pp. 106-107 (in Ukrainian).
15. Myrontsov, M. L. (2019, May). The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. 18th Int. Conf. Geoinformatics – Theor. and Appl. Aspects, Extended Abstracts, (Paper 15885), Kyiv.

Received 30.09.2019

М.Л. Миронцов

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ
E-mail: myrontsov@ukr.net

РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ СВЕРДЛОВИН ПІДВИЩЕНОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

Запропоновано новий швидкий спосіб розв'язання оберненої задачі багатозондової електрометрії свердловин, який дозволяє враховувати кількісний вклад вимірювання кожного зонда в остаточний результат. Розроблено та реалізовано в програмному вигляді відповідний алгоритм розв'язання оберненої задачі. Показано, що запропонований підхід дозволяє істотно покращувати вертикальну роздільну здатність методу в цілому. Наведено приклад порівняння різних результатів розв'язання оберненої задачі бокового каротажного зондування і бокового каротажу при зміні вкладу вимірювання кожного зонда в остаточний результат.

Ключові слова: обернена задача електрометрії, електричний каротаж, вертикальна роздільна здатність

M.L. Myrontsov

Institute of Telecommunications and Global Information Space
of the NAS of Ukraine, Kyiv
E-mail: myrontsov@ukr.net

SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF ELECTROMETRY OF WELLS WITH INCREASED VERTICAL RESOLUTION

A new fast method of solving the inverse problem of multiprobe electrometry of wells is proposed. It allows one to account for the quantitative contribution of measuring each probe to the final result. The algorithm for solving the inverse problem has been developed and implemented in a software. It is shown that the proposed approach can also significantly improve the vertical resolution of the method as a whole. An example of the comparison of various results of solving the inverse problem of lateral logging sounding and lateral logging, when changing the contribution of the measurement of each probe to the final result, is given. It is concluded that the use of a quick method for solving the minimization of the residual functional, if combined with the ability to consider the contribution of each probe of the multiprobe electrometric complex to the final result of solving the inverse problem, makes it possible to increase the accuracy of a quantitative interpretation. It is also shown how the developed algorithm and the corresponding created software make it possible to increase the accuracy of determining the geoelectric parameters of oil and gas reservoirs. The results of the work were introduced into the production at a number of commercial geophysical organizations.

Keywords: inverse electrometry problem, electric logging, vertical resolution.